УДК 669.017:539.373

МЕЗОМЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Е. Панин, А.И. Слосман, Н.А. Антипина

Поверхностное упрочнение всегда было и остается одним из наиболее актуальных проблем материаловедения. Поверхностно упрочненные материалы являются структурно неоднородными, и их поведение при механическом нагружении невозможно достаточно полно и адекватно анализировать ни на основе механики деформируемого твердого тела, ни на основе теории дислокаций. Более двух десятилетий назад Томской школой материаловедов было создано и в настоящее время успешно развивается новое научное направление в области физики пластичности и прочности - физическая мезомеханика структурно неоднородных материалов [1]. На кафедре композиционных материалов и покрытий ТПУ в течение ряда лет ведутся исследования по поведению поверхностно упрочненных материалов при механическом нагружении и, в том числе, при изнашивании на основе представлений физической мезомеханики. Результаты этих исследований будут полезными для оптимизации режимов поверхностного упрочнения изделий в зависимости от предъявляемых требований к их свойствам и для прогнозирования поведения этих изделий в процессе эксплуатации.

Введение

Для пластической деформации поверхностно упрочненных материалов с позиций физической мезомеханики материалов характерны две особенности. *Во-первых*, при формировании поверхностного упрочненного слоя и при механическом нагружении поверхностно упрочненных материалов на границе упрочненный слой-подложка создаются контактные напряжения, имеющие осциллирующий характер. Периодичность пиковых значений этих напряжений определяется, в первую очередь, соотношением механических свойств слоя и подложки и их геометрических параметров. Места пиковых значений следует рассматривать как концентраторы напряжений (КН) мезомасштабного уровня. *Во-вторых*, на упрочненной поверхности затруднено образование и движение дислокаций (увеличены силы изображения), формирование деформационного рельефа, а значит, затруднены процессы пластической деформации на микроуровне в приповерхностных объемах деформируемых поверхностно упрочненных материалов [2]. Поэтому при нагружении поверхностно упрочненных материалов можно ожидать, что важную роль в пластической деформации будут играть процессы на мезомасштабном уровне.

Материалы и методика исследований

Основные исследования по этому вопросу были проведены на образцах из сталей 65Х13 и 12ХМФ1, подвергнутых поверхностному упрочнению путем ионного азотирования. Толщину и свойства упрочненного слоя регулировали режимом ионного азотирования, свойства сердцевины - составом и предварительной термической обработкой образцов. При статическом нагружении образцов наблюдали за процессами на упрочненных поверхностях и в объеме образца. Для изучения процессов пластической деформации в объеме поверхностно упрочненных образцов, на их двух боковых гранях удаляли упрочненный слой и наблюдали за поверхностью этих граней в процессе растяжения образцов с помощью оптико-телевизионного измерительного комплекса TOMSC [3].

Результаты экспериментов и их обсуждение

Фрагментирование поверхности. Исследования процесса растяжения поверхностно упрочненных образцов наблюдением за упрочненной поверхностью показали, что релаксация пиковых значений осциллирующих контактных напряжений в упрочненном слое происходит путем образования квазипериодической системы поверхностных микротрещин, ориентированных нормально оси образца. Частота распределения микротрещин соответствует, очевидно, частоте пиковых значений осциллирующих контактных напряжений. С увеличением толщины упрочненного слоя эта частота уменьшается, а с уменьшением разницы в свойствах слоя и сердцевины (создаваемым термической обработкой) - увеличивается (рис. 1). С увеличением деформации процесс фрагментации поверхности эволюционизирует. Эволюция заключается в том, что на упрочненной поверхности появляются новые микротрещины, делящие ранее образовавшиеся фрагменты поверхности на более мелкие. При этом на определенной промежуточной стадии деформации, когда новые микротрещины

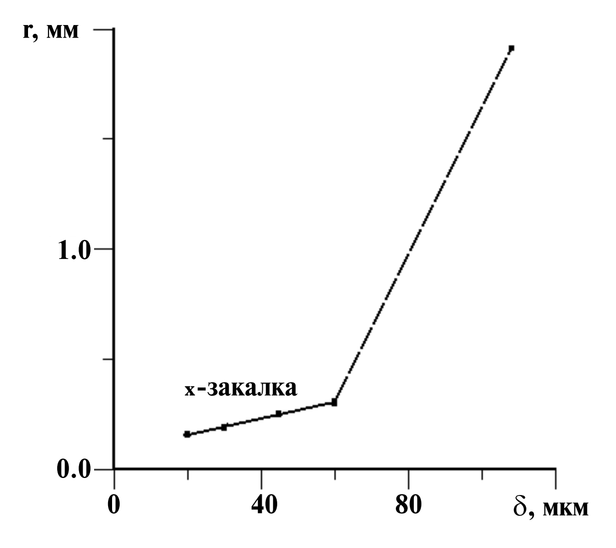


Рис. 1. *Зависимость межтрещинных расстояний от толщины упрочненного слоя на отожженной стали 65Х13*

делят только часть ранее образовавшихся фрагментов, распределение расстояний между трещинами приобретает бимодальный характер, который исчезает при больших деформациях (рис. 2). Характерно, что практически процесс вторичной фрагментации поверхности происходит в весьма узком интервале деформаций (около 1 %).

Фрагментирование в объеме. При достижении напряжения течения неупрочненного материала, практически одновременно с образованием первых микротрещин на упрочненных гранях, на гранях с удаленным упрочненным слоем образуются две сопряженных системы полос локализованной деформации (ПЛД), распространяющихся от поверхностных микротрещин вглубь образца под углом 45° к его оси (рис. 3). Взаимно пересекаясь, эти полосы формируют в объеме образца мезоструктуру (расстояния между микротрещинами и ПЛД соответствуют мезомасштабному уровню). Внутри полос процессы пластической деформации идут на более низких масштабных уровнях (рис. 3, *в*). Степень развития мезополос, то есть степень распространения мезоструктуры в объеме образца, определяется эффективностью поверхностных мезоКН, которая в свою очередь зависит от толщины упрочненного слоя. Заметим, что эффективность мест пиковых значений осциллирующих контактных напряжений как мезоКН усиливается образовавшимися в этих местах поверхностными трещинами.

Влияние толщины упрочненного слоя. В зависимости от глубины распространения мезополос от поверхности вглубь поверхностно упрочненного образца, (определяемой толщиной упрочненного слоя) можно выделить три варианта протекания процесса пластической деформации: распространение ПЛД менее, чем на половину толщины образца (рис. 4, *а*), больше, чем на половину толщины (рис. 4, *б*) и на всю толщину образца (рис. 4, *в*). В первом случае мезоструктура формируется в приповерхностных слоях, а сердцевина ведет себя как

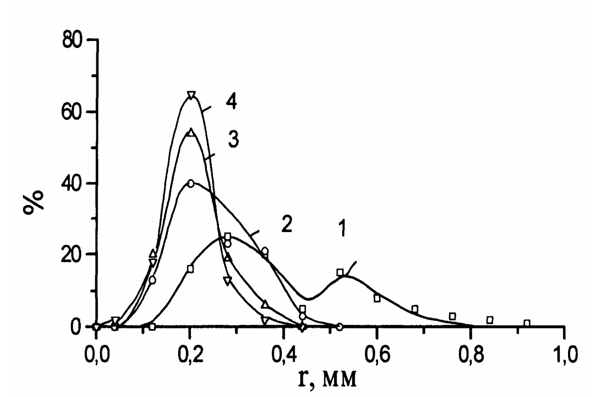


Рис. 2. *Распределение величины межтрещинных расстояний в зависимости от степени деформации: 1) ε = 0,5 %; 2) ε = 1 %; 3) ε = 2 %; 4) ε = 4 %*

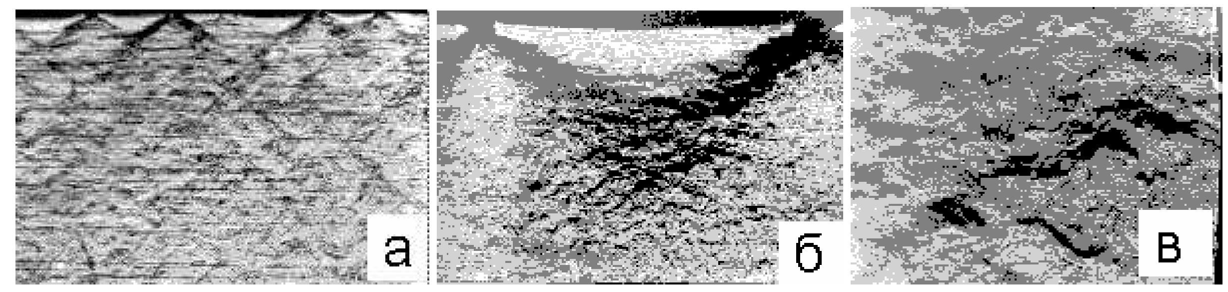


Рис. 3. *Мезоструктура на поверхности деформированного образца: а) x100, б) x600, в) x1000*

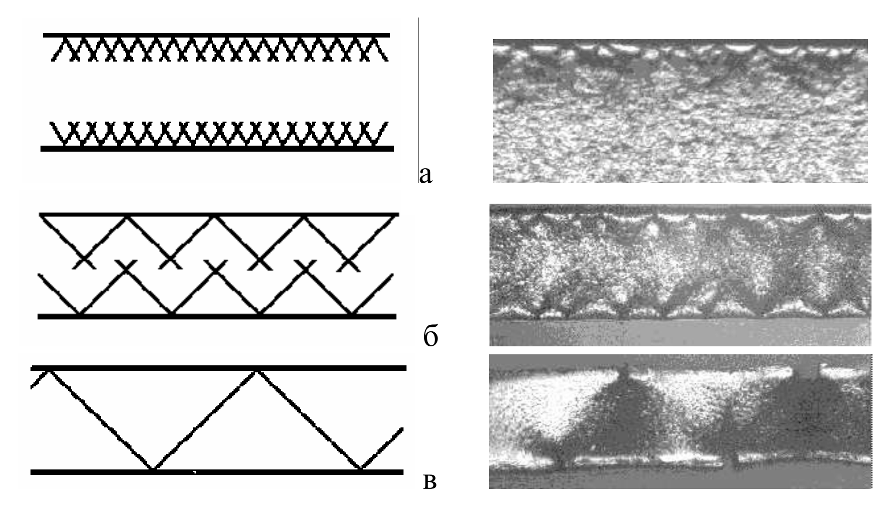


Рис. 4. *Схемы и фотографии мезоструктур образцов с толщиной упрочненного слоя: а) 20; б) 45; в) 110 мкм; x25*

в неупрочненном образце. Во втором случае зоны со сформировавшейся мезоструктурой перекрываются, и мезоструктура формируется во всем объеме образца. Характерно, что в этих двух случаях системы поверхностных микротрещин на противоположных упрочненных гранях образуются независимо друг от друга. В третьем случае от одного из мезоКН на границе слой-подложка как от базового КН, усиленного образовавшейся в упрочненном слое микротрещиной, в неупрочненный объем распространяется ПЛД. Достигнув противоположной упрочненной грани, она инициирует возникновение на этой грани нового концентратора напряжений путем образования другой микротрещины, от которой в свою очередь в направлении максимальных касательных напряжений следует отраженная ПЛД в сторону противоположной грани, образуя следующий концентратор напряжений в виде микротрещины и так далее.

Одиночные волны пластической деформации. В последнем варианте формирование систем микротрещин на противоположных упрочненных гранях образца происходит последовательно и взаимосвязанно. При этом связь между периодичностью расположения пиковых значений осциллирующих контактных напряжений и периодичностью системы поверхностных микротрещин нарушается (на рис. 1 это наблюдается при толщине упрочненного слоя около 60 мкм). Такой процесс пластической деформации можно представить как прохождение вдоль образца одиночных волн пластической деформации (рис. 5). Их можно классифицировать как волны макромасштабного уровня деформации, поскольку размеры образующихся при их прохождении фрагментов соизмеримы с размерами образца. Основной вклад в пластическую деформацию вносит движение этих фрагментов как целого, то есть с самого начала пластической деформации в процесс вовлекается и становится определяющим макромасштабный уровень деформации. Этому соответствует максимальная локализация деформации в ПЛД.

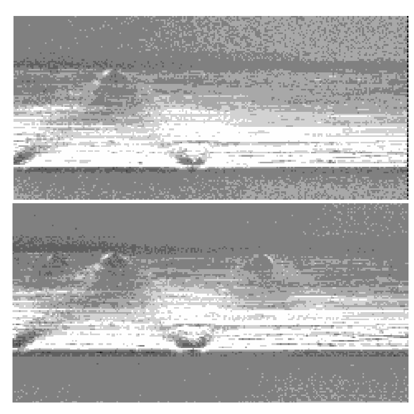
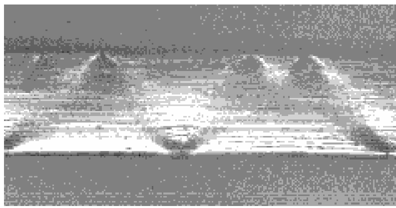



Рис. 5. *Распространение полосы локализованной деформации при растяжении образца с толщиной упрочненного слоя 110 мкм*

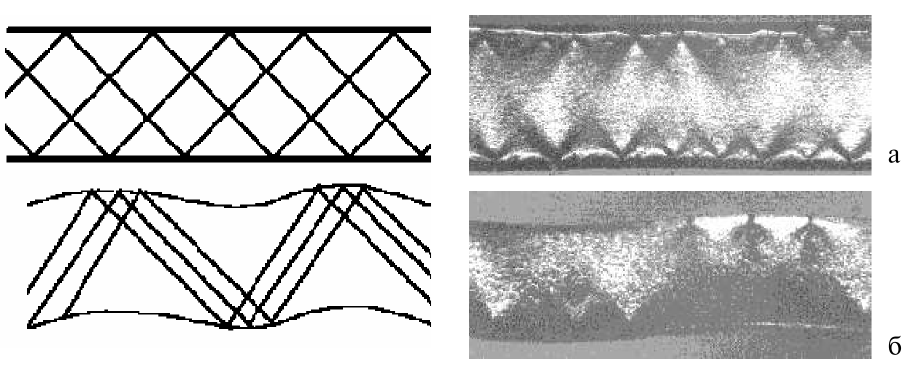


Рис. 6. *Схемы и фотографии мезоструктур, образующихся при прохождении волн локализованной деформации; а) волны равномерно распределены вдоль оси образца, б) волны сгруппированы; х25*

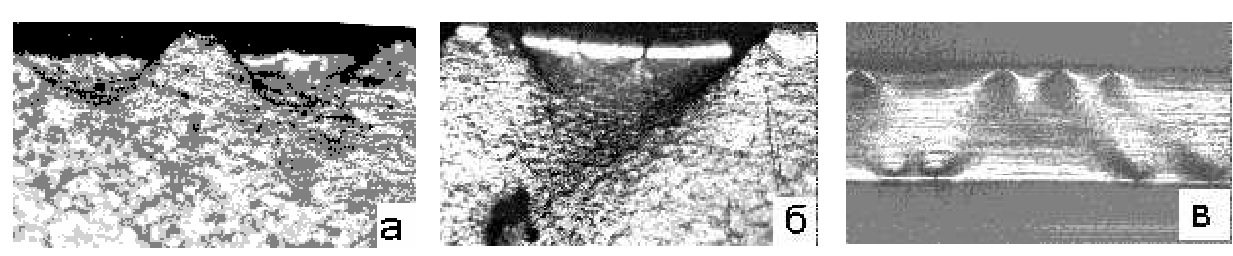


Рис. 7. *Движение мезообъемов как целого: а) х400; б) х400; в) х30*

В процессе нагружения вплоть до разрушения в образце может реализоваться одна или несколько волн локализованной деформации. Деформация путем прохождения одиночной волны наблюдается, когда материал обладает высокой пластичностью на микроуровне, и может происходить весьма сильная локализация деформации в макрополосах. В этом случае поперечная составляющая деформации образца, обусловленная встречным движением соседних мезообъемов в волне локализованной деформации, вызывает осциллирующее формоизменение образца (рис. 4, *в*).

Как правило, в подобных случаях деформация происходит путем прохождения вдоль оси образца нескольких волн. Вызванная этим деформация образца является суммой деформаций, обусловленных прохождением каждой волны. Поэтому, если места максимумов расположены достаточно равномерно вдоль оси образца, поперечная деформация от прохождения каждой волны в значительной мере компенсируется, и ось образца остается практически неизменной (рис. 6, *а*). Если же максимумы волн группируются, то в результате суммирования поперечных деформаций ось образца заметно искривляется (рис. 6, *б*).

Движение мезообъемов по схеме "сдвиг + поворот". После формирования мезоструктуры в результате взаимодействия мезополос локализованной деформации, дальнейшая пластическая деформация в основном реализуется путем движения элементов этой мезоструктуры (мезообъемов) как целого по схеме "сдвиг + поворот". Мезообъемы могут вдавливаться в образец, экструдируя материал соседних объемов (рис. 7, *а*), поворачиваться (рис. 7, *б*). Смежные мезообъемы могут смещаться в противоположных направлениях. На рис. 7, *в* мезообъемы (трехгранные призмы), обращенные вершинами к верхней упрочненной поверхности, смещаются вдоль оси в направлении от наблюдателя, а призмы, обращенные вершинами к нижней упрочненной поверхности - к наблюдателю. Поскольку основания призм более жестко связаны с внутренним объемом образца, смещаются преимущественно вершины призм (на рисунке вершины треугольников, обращенные к верхней поверхности - светлые, а к нижней - темные). На рис. 8 показано движение двух мезообъемов друг относительно друга, наблюдаемое с помощью картины полей векторов смещений.

При движении мезообъемы взаимодействуют друг с другом, и в них, а также в разделяющих их полосах локализованной деформации создается сложнонапряженное состояние, что вызывает необходимость аккомодационных процессов. Такими процессами могут быть деформация на микроуровне внутри мезообъемов, возникновение деформационных доменов, вторичная фрагментация исходных мезообъемов на более низких масштабных уровнях.

Вторичная фрагментация. На упрочненной поверхности и в приповерхностных мезообъемах релаксация напряжений, создающихся в результате взаимодействия мезообъемов, происходит путем образования дополнительных микротрещин на упрочненной поверхности (что обусловливает описанную выше эволюцию распределения межтрещинных расстояний с увеличением степени деформации), а в упрочненном объеме - дополнительных полос локализованной деформации, которые делят ранее образовавшиеся мезообъемы на более мелкие фрагменты, геометрически подобные исходным мезообъемам (рис. 9).

Внутри крупных (первичных) мезообъемов, как аккомодационный процесс, может также происходить формирование доменной субструктуры. На рис. 9 приведены картины полей векторов смещений на боковой поверхности с удаленным упрочненным слоем, где локализация пластической деформации привела к образованию мезополосы, ориентированной нормально оси образца, которую можно интерпретировать как "мезошейку". Эта полоса начинается от поверхностной микротрещины,

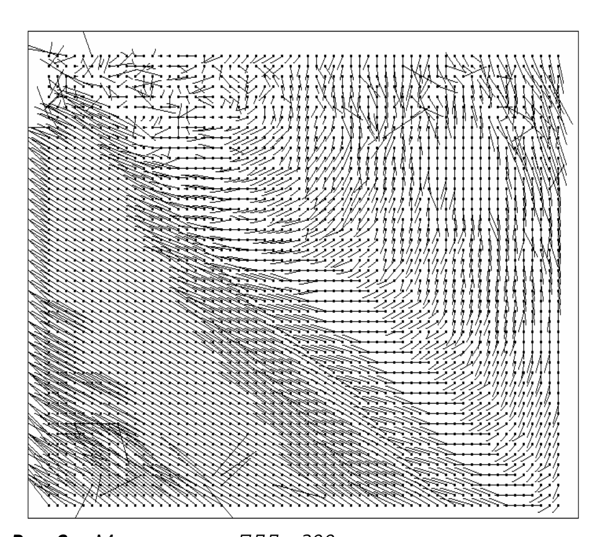


Рис. 8. *Мезоструктура ПЛД; x200*

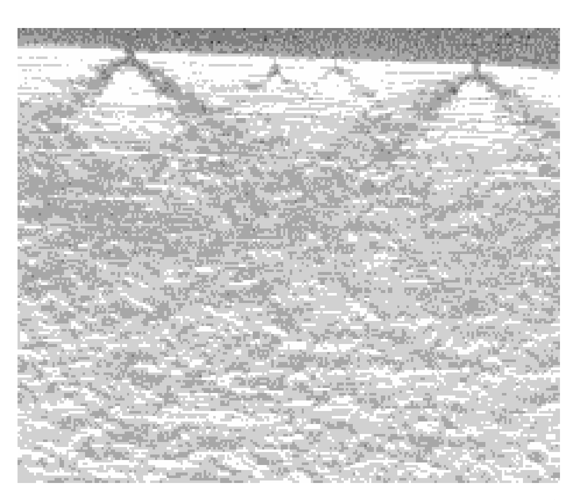


Рис. 9. *Разделение крупного приповерхностного мезообъема на более мелкие; x260*

зародившейся на упрочненной поверхности образца. На начальных стадиях деформации эта "мезошейка" разделяет достаточно крупные мезообъемы прямоугольной формы. На рис. 9, *б* приведено распределение продольной компоненты ε_{xx} тензора дисторсии для картины, приведенной на рис. 9, *а*. Видно, что на этой стадии нагружения пластическая деформация в пределах мезообъемов практически не происходит, а на их границах наблюдается значительные скачки ε_{xx}. С увеличением степени деформации, в условиях создающегося сложнонапряженного состояния, в исходных мезообъемах, как результат аккомодационного процесса, образуются прямоугольные деформационные домены более низкого масштабного уровня (рис. 9, *в, г*).

Механические свойства и разрушение. Блокирование движения дислокаций на поверхности и усиление роли процессов на мезоуровне при нагружении поверхностно упрочненных материалов обусловливает увеличение сопротивления деформации поверхностно упрочненных образцов. С увеличением толщины упрочненного слоя этот эффект усиливается, однако, при достаточно большой толщине слоя (в обсуждаемом эксперименте более 50 мкм) предел прочности уменьшается, что, очевидно, объясняется усилением роли поверхностных трещин как КН и соответствующим усилением локализации деформации. Последним объясняется и уменьшение пластичности образцов.

Таким образом, уменьшение пластичности поверхностно упрочненных образцов может быть объяснено повышением масштабного уровня деформации с самого начала нагружения. В физической мезомеханике материалов считается, что процесс разрушения начинается с начала пластической деформации: при деформации на каждом уровне происходит образование несплошностей соответствующего уровня. Выход на макроуровень сопровождается образованием макронесплошностей и завершается разрушением.

При нагружении поверхностно упрочненных образцов с самого начала появляются несплошности мезомасштабного уровня: трещины в поверхностном слое. В результате движения мезообъемов как целого, эти трещины распространяются по мезополосам локализованной деформации. С увеличением деформации и усилением роли макромасштабного уровня одна из таких трещин (там, где происходит максимальная локализация деформации) становится макротрещиной. Это может произойти там, где совмещаются максимумы гармоник модуляции пластической деформации (рис. 10, *в*), то есть при нагружении поверхностно упрочненных образцов расположения места локализации деформации на макроуровне и последующего разрушения имеет не стохастический характер, а детерминировано в том смысле, что оно связано с периодичностью модуляций пластической деформации, определяемой толщиной упрочненного слоя.

Деформация и разрушение при изнашивании. Одной из основных целей поверхностного упрочнения (в том числе азотирования) является повышение износостойкости. Процесс изнашивания неразрывно связан с пластической деформацией приповерхностных слоев материала. Поэтому, процессы изнашивания, особенно в случае поверхностно упрочненных материалов, целесообразно рассматривать с учетом представлений физической мезомеханики материалов.

Металлографические исследования показали, что на упрочненных изнашиваемых поверхностях образуются квазипериодические системы микротрещин, аналогичные тем, что образуются при статическом нагружении поверхностно упрочненных материалов. Под упрочненным слоем наблюдали

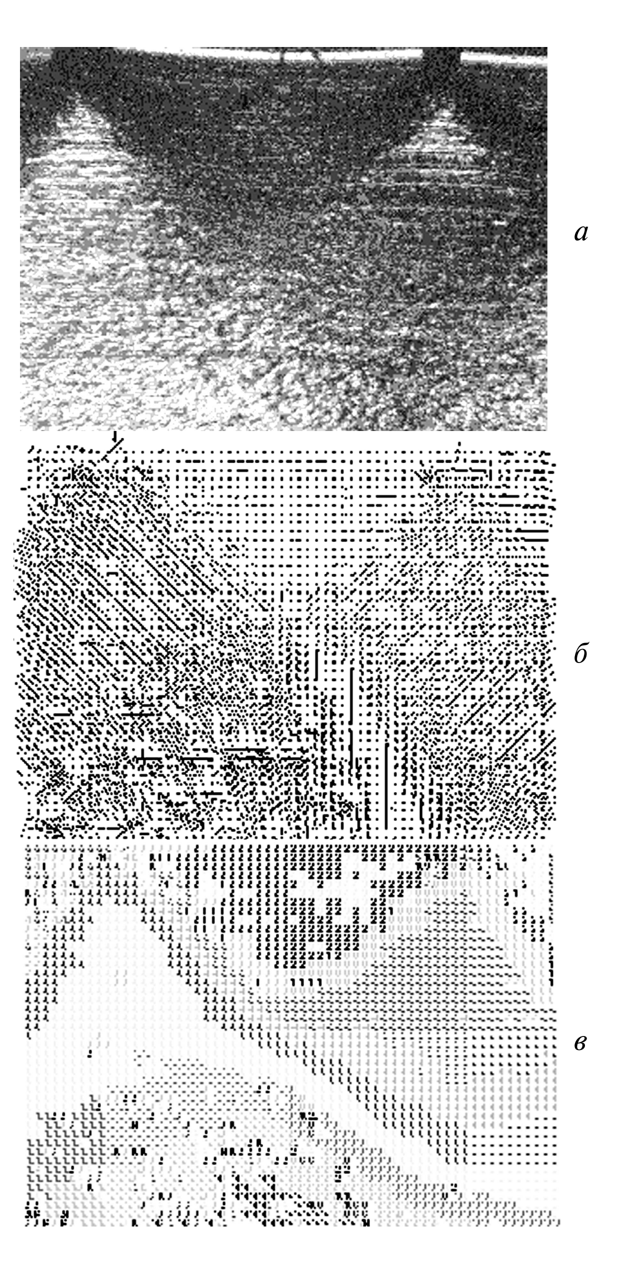


Рис. 10. *а) фотография; б) поле векторов смещений; в) распределение поперечной компоненты векторов смещений; толщина слоя - 65 мкм, ε = 9,5±0,1 %; х100*

образование заторможенной на микроуровне деформации. Толщина этой зоны находится в пределах десятков микрометров. За ней располагается зона (слой) локализованной деформации (рис. 11). Характерно, что он состоит из многих подслоев (аналогично тому, как при деформации на микроуровне пачки скольжения представляют собой совокупность линий скольжения). По этой зоне в процессе изнашивания происходит сдвиг упрочненного слоя и зоны заторможенной деформации относительно основного объема образца. При толщине упрочненного слоя 10 мкм ширина слоя локализованной деформации, определенная металлографически, составляет 30...60 мкм, а суммарная величина сдвига верхней части образца относительно нижней 15...30 мкм.

Измерения микротвердости показали, что, вследствие деформационного упрочнения, микротвердость слоя локализованной деформации значительно увеличивается: если микротвердость зоны заторможенной деформации и внутренней части образца составляет 450...500 МПа, то микротвердость зоны локализованной деформации достигает 700...750 МПа, что подтверждает сильную локализацию пластической деформации в этом слое.

От поверхностных трещин на изнашиваемой поверхности происходит распространение мезополос локализованной деформации. На некотором расстоянии от поверхности эти мезополосы замыкаются друг на друга. При этом происходит аннигиляция мезоКН и фрагментация приповерхностных слоев (рис. 12, *а*). В дальнейшем по мезополосам распространяются трещины, и изнашивание может происходить путем выкрашивания образовавшихся мезообъемов. Наблюдали также вторичную фрагментацию: квазипериодическое растрескивание первичных мезообъемов на более мелкие (рис. 12, *б*). По-видимому, этим можно объяснить известный из литературы бимодальный характер распределения по размерам частиц износа. При толщине слоя более 110 мкм процессы пластической деформации и разрушения локализуются в пределах упрочненного слоя (рис. 13). В этом случае механизмы изнашивания и износостойкость определяются свойствами материала слоя.

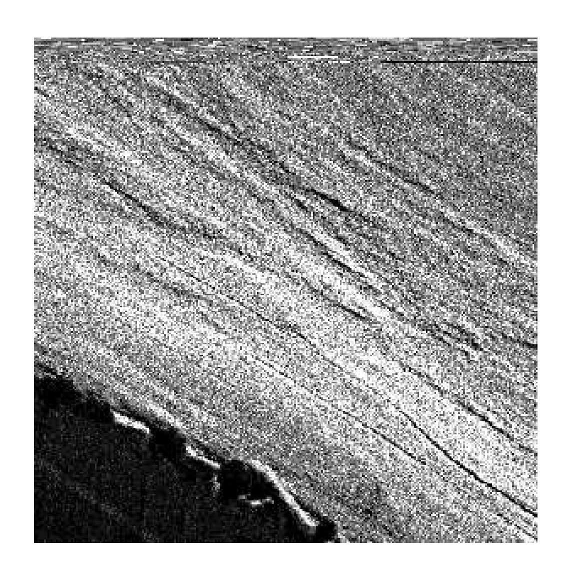
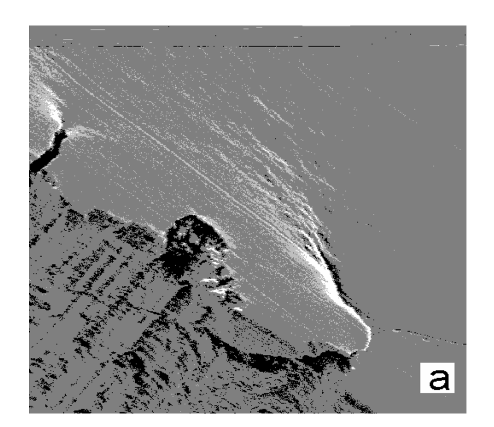


Рис. 11. *Зона заторможенной деформации; х600*

Заключение

Результаты изучения процессов пластической деформации, разрушения и изнашивания поверхностно упрочненных материалов свидетельствуют о следующем:

- с самого начала нагружения идут в явном виде и играют важную роль процессы мезомасштабного уровня (квазипериодическое растрескивание упрочненной поверхности, образование и распространение мезоПЛД, формирование мезоструктуры, образование деформационных доменов, вторичная фрагментация);
- важным аккомодационным процессом, происходящим на разных масштабных уровнях, является модуляция пластической деформации в приграничных между отдельными объемами зонах, вызываемая различием их свойств;
- металлографические исследования и анализ кривых течения подтверждает действие прин-



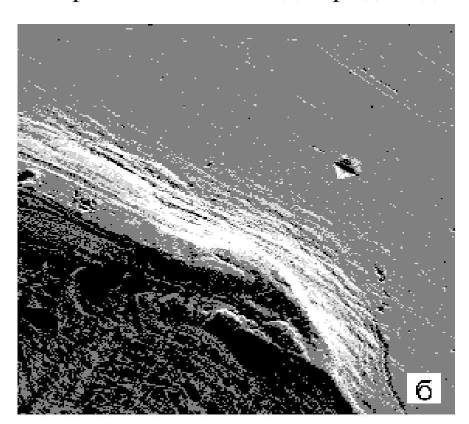


Рис. 12. *Первичная (а) и вторичная (б) фрагментация при изнашивании; х600*

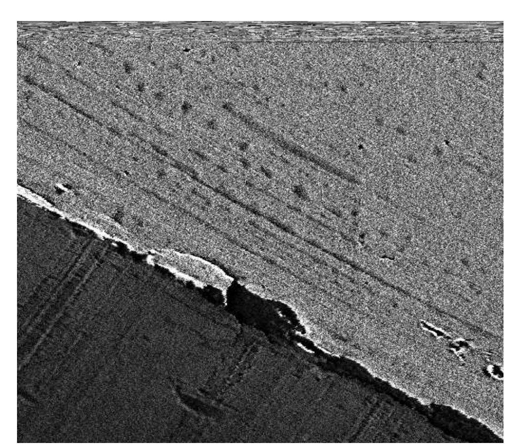


Рис. 13. *Разрушение упрочненного слоя, х600*

ципа подобия процессов деформации как на разных масштабных уровнях, так и в пределах мезоуровня;

- процесс разрушения прослеживается с самого начала нагружения: возникновение осциллирующих контактных напряжений на границе упрочненного слоя и подложки, образование поверхностных трещин и мезоПЛД, распространение поверхностных трещин по этим полосам, выход на макроуровень, завершающийся окончательным разрушением;
- при изнашивании поверхностно упрочненных материалов в приповерхностных слоях происходят процессы пластической деформации на мезоуровне (образование поверхностных трещин, мезоПЛД, фрагментация), во многом сходные с процессами при статическом нагружении и предопределяющие процесс изнашивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В. и др. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. - Новосибирск: Наука, 1995. - Т. 1 - 298 с., Т. 2 - 320 с.
2. Слосман А.И. Разработка технологий сопряжения структурных составляющих в гетерогенных материалах на основе представлений физической мезомеханики: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01 / Том. политехн. ун-т. - Томск, 2000. - 71 с.
3. Сырямкин В.И., Панин С.В., Зуев Н.А., Чесноков А.В., Левин К.В. Автоматизированная система для измерения рельефа поверхности материалов // Заводская лаборатория. - 2000. - Т. 66, вып. 9. - С. 39-42.

УДК 541.135.7:541.138.2